

БЕЗПЕКА КОМП'ЮТЕРНИХ МЕРЕЖ ТА ІНТЕРНЕТ / NETWORK & INTERNET SECURITY

DOI: [10.18372/2225-5036.26.14917](https://doi.org/10.18372/2225-5036.26.14917)

МЕТОДОЛОГІЧНІ ОСНОВИ СТВОРЕННЯ ЕЛЕМЕНТІВ КОМПЛЕКСНИХ СИСТЕМ ЗАХИСТУ ІНФОРМАЦІЇ: ФІЗИЧНА МОДЕЛЬ ШТУЧНОЇ МОЛЕКУЛЯРНОЇ ПАМ'ЯТІ НА ОСНОВІ ДВОХ ТИПІВ ОРГАНІЧНИХ СПОЛУК

Олена Ключко, Володимир Шутко, Олена Колганова

Національний авіаційний університет

КЛЮЧКО Олена Михайлівна, к.б.н., доцент



Рік та місце народження: 1959, Київ.
Освіта: Національний університет ім. Тараса Шевченка, Київ, (1981); Національний Авіаційний університет, Київ (2003), Міжнародний університет лінгвістики та права (1999).
Посада: доцент кафедри електроніки, робототехніки, моніторингу та Інтернету речей Національного авіаційного університету.
Наукові інтереси: біоінформатика, біофізика, екологія, науки про мозок.
Публікації: більше 230, включно з монографіями, науковими та навчальними статтями, патентами.
E-mail: kelenaXX@ukr.net.
Orcid ID: 0000-0003-4982-7490.

ШУТКО Володимир Миколайович, д.т.н., професор



Рік та місце народження: 1970, Київ.
Освіта: повна вища, Московський державний технічний університет ім. Баумана, Москва, Росія, (1993).
Посада: завідувач кафедри електроніки, робототехніки, моніторингу та Інтернету речей Національного авіаційного університету.
Наукові інтереси: цифрова обробка сигналів та зображень.
Публікації: більше 160, включно з монографіями, науковими статтями, патентами.
E-mail: vnshutko@ukr.net.
Orcid ID: 0000 0002 9761 5583.

КОЛГАНОВА Олена Олегівна, к.т.н.



Рік та місце народження: 1979, Київ.
Освіта: повна вища: Національний авіаційний університет, Київ, Україна, (2007).
Посада: асистент кафедри інженерії програмного забезпечення Національного авіаційного університету.
Наукові інтереси: цифрова обробка сигналів та зображень.
Публікації: більше 50, включно з монографіями, науковими статтями.
E-mail: kolganovae79@gmail.com.
Orcid ID: 0000 0002 1301 9611.

Анотація. У даній статті була описана розроблена гіпотетична фізична модель штучної молекулярної пам'яті на основі двох типів органічних сполук – похідних фенолу та індолу, які потенційно можуть бути застосовані для виконання функцій такої пам'яті у нано-електронних пристроях. Розроблена фізична модель демонструвала властивості штучної «пам'яті». Вона була подібною до інших прототипів, які виготовляли за допомогою молекул хіноліну та/або молекул-похідних нітроанілін оліго (фенілен етилену), однак нами було застосовано молекули інших типів – суміш похідних фенолу та індолу із замісниками – поліаміновими ланцюгами різної довжини та складності (JSTX-3, AR, ARN-1, ARN-2). Виготовлені нами системи були сформовані шляхом нашарування один на одного 2D та/або 3D наборів шарів органічних речовин, які можна було

замінювати. Шари з ізотропними та анізотропними властивостями повинні чергуватися між собою. Випробування функціонування таких зразків проводили шляхом запису електричних іонних струмів, які проходили через них. Струми були асиметричними залежно від того, чи протікали вони по поліаміновому ланцюгу "до" чи "від" фенольного циклу. Для реєстрації та випробування таких елементарних електричних струмів використовували методи patch-clamp та реєстрації трансмембранних іонних струмів у режимі фіксації потенціалу. Деякі отримані дані носять попередній характер і для виготовлення промислових зразків необхідно виконати великий об'єм подальших робіт. Запропонований спосіб дозволяє модифікувати та утворювати нові елементи пам'яті природного та штучного походження, а також виконувати тестування їх функціонування шляхом реєстрації електричних струмів через утворений зразок. Зареєстровані струми мають асиметричний характер, демонструючи властивості пам'яті зразка. Розроблені методи та пристрої захищені патентами України на корисні моделі. Описано, які нові можливості кодування та захисту інформації на основі фізичної моделі відкриває виконана робота.

Ключові слова: фізична модель, штучна молекулярна пам'ять, нано-електронна пам'ять, хімічні сполуки, похідні фенолу, похідні індолу.

ВСТУП

Проблема створення запам'ятовуючих пристроїв у техніці на основі розробок штучної молекулярної пам'яті привертає останніми роками увагу все більшої кількості науковців та інженерів [1-6]. Такі роботи дозволяють вирішити як завдання мінімізації сучасної обчислювальної техніки, так і створюють нові можливості створення новітніх комп'ютерних пристроїв та систем на основі наших більш глибоких знань фізичного світу.

Однією із найбільш перспективних технічних ідей у цьому напрямку є створення так званої «штучної молекулярної пам'яті» (ШМП), або «нано-електронної пам'яті» (НЕП) [1-3]. Колективи професіоналів у галузях інформаційно-комп'ютерних технологій (ІКТ) у різних країнах світу (США, Китаї, країнах ЄС та ін.) працюють над різними аспектами вирішення цієї задачі – структурою елементарних комірок ШМП, підбором найбільш підходящих сполук-кандидатів для них, архітектурою компютерів на базі ШМП, іншими [1-3]. Застосовані у ШМП молекулярні структури відрізняються від тих, які задіяні для вирішення подібних задач у сучасних комерційних зразках техніки. Такі розробки вважаються достатньо перспективними, інформація про них є в університетських підручниках з ІКТ у США та країнах Західної Європи вже протягом останніх близько 10 років, у наших роботах ми також надавали інформацію про них [6]. Інтенсивні роботи у цьому напрямку виконують у тому числі і шляхом створення нових фізичних моделей відповідних пристроїв та їх нано- елементів.

У своїх попередніх публікаціях ми вже надавали попередню інформацію щодо своїх робіт у цьому напрямку, а саме щодо підбору деяких органічних сполук – вуглеводнів, похідних фенолу з поліаміновими замісниками різної довжини та ступеня розгалуженості, як кандидатів на функціональні елементи ШМП. Оскільки один з авторів протягом довгих років досліджувала функції молекул ароматичних вуглеводнів – похідних фенолу та амфільних сполук іншої будови у структурах природної пам'яті, то результати робіт, наведені нижче, є продовженням цих багаторічних робіт із досліджень речовин, потенційно придатних на роль елементів штучної молекулярної пам'яті та створення нових фізичних моделей відповідних пристроїв та їх нано- елементів.

Метою виконаної роботи було розробити методологічні основи створення штучної пам'яті на основі суміші двох типів молекул-похідних фенолу та індолу

як елемента у складі комплексних систем захисту інформації; розробити фізичну модель такої штучної молекулярної пам'яті, а також пояснити переваги такого пристрою з точки зору захисту інформації.

ОСНОВНА ЧАСТИНА

Деякі прототипи, покладені в основу виконаної роботи. За означенням, «нанопам'ять, або молекулярна пам'ять» (відповідно «комірка нанопам'яті»...) є штучно створений запам'ятовуючий пристрій, асемблований із елементів нано- розмірів; вони застосовуються при розробці сучасних комп'ютерів супермалих (нано) розмірів. У нашому випадку та у ряді прототипів такими елементами є молекули – похідні фенолів та індолів [2-6]. Нижче наведемо опис деяких прототипів, які були покладено в основу виконаної нами роботи.

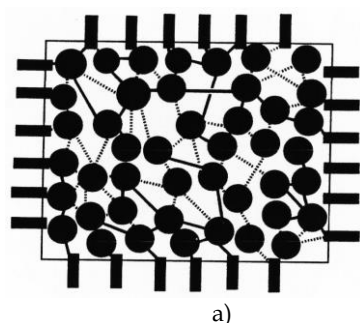
У прототипі [1] описано пристрій пам'яті та пам'ять для нього, яка включає в себе безліч пристроїв пам'яті. Кожний пристрій пам'яті містить відокремлені джерела та ділянки стоків, канал, бар'єрний ізоляційний шар, нанокристал або множини нанокристалів, контрольний бар'єрний шар та електрод входу. Нанокристал може бути квантовою крапкою, у ньому може бути «збереженим» один електрон чи дірка, або дискретне число електронів чи дірок. При кімнатній температурі при цьому забезпечується такий поріг зміни напрут, який перевищує величину теплових стрибків напрут для кожної із «записаних у пам'яті» характеристик відповідно електрона чи дірки. У цьому винаході використано кулонівську блокаду для електростатичного з'єднання одного або декількох «збережених» електронів чи дірок із каналом, уникаючи при цьому того, щоб «збережені» заряди не «відчували на собі» вплив провідності, контрольованої кулонівською блокадою.

Як інший приклад пристрою із нано-електронною пам'яттю необхідно розглянути той, що описано у способі створення елементів нано-електронної пам'яті у [2]. Цей спосіб базується на тому, що створюють нано-електронну матрицю пам'яті; фактично цей запам'ятовуючий пристрій містить масив комірок пам'яті, розташованих у рядах і стовпцях, сконструйованих над субстратом, кожна комірка пам'яті включає в себе перший сигнальний електрод, другий сигнальний електрод і наночастицю, розміщену в області перетину між першим сигнальним електродом і другим сигнальним електродом; при цьому утворюється множина смугових ліній, кожна з яких сполучає перші сигнальні електроди ряду комірок пам'яті; та

множина бітових ліній, кожна з яких з'єднує електроди другого сигналу зі стовпчика комірок пам'яті. Недоліками цього способу є те, що невідомі переконливі дані, чи функціонують (та чи справді добре функціонують) такі елементи саме як елементи пам'яті; це ставить під сумнів якість та ефективність роботи такої системи. У прототипі [2] описані елементи, які на мікро- та нанорівнях копіюють відповідні макроструктури, не використовуючи всіх переваг мікро- та нанотехнологій.

Нарешті, у якості іншого перспективного прототипу до виконаної розробки необхідно розглянути технічне рішення зі створенням наносумішей (наноконпаундів) для пристроїв пам'яті із компонентів - органічних речовин [3]. Цей прототип являє собою наносуміш (наноконпаунд) із компонентів, які мають властивості пам'яті. Описана суміш з наноконпаундів вклучає в себе метал або його оксид та органічну сполуку, здатну окислювати і відновлювати зв'язок з металом або його оксидом; у прототипі використані органічні сполуки - хіноліни. Цей винахід відноситься також до запам'ятовуючого пристрою, який містить у собі розроблені органічні наноконпаунди. Недоліками способу-прототипу [3] є те, що серед органічних речовин-наноконпаундів цього пристрою недостатнє застосування знайшли похідні фенолів із замісниками - поліаміновими ланцюгами різної довжини й різного ступеня складності, застосування яких дозволяє покращити ряд характеристик молекулярної пам'яті. Це ставить під сумнів ефективність роботи системи пам'яті в прототипі [3] її якість і достовірність отриманих у [3] результатів.

Фізична модель фрагменту штучної молекулярної пам'яті на основі молекул-похідних фенолу й індоли та "електронна пастка". При розгляді вищевказаних прототипів штучної молекулярної (нано) пам'яті привертає увагу ряд характерних рис, для їх аналізу звернемося до рис. 1. На ньому зображено фрагмент вже виготовленого зразка ШМП - вигляд згори (рис. 1,а). Видно, що як і у прототипі [1], фрагмент розділений на компартменти - різні функціональні зони. Серед них вирізняються прямокутні темні зони контактів та округлі темні кола - локуси кріплення молекул ароматичних вуглеводнів - наприклад, похідних фенолу (рис. 2).



Молекули таких вуглеводнів відіграють основну роль у перерозподілі електронів, що формують електричні нано-струми у обох напрямках вздовж лінійної ділянки поліаміну - «до» та «від» фенольного кільця. Механізм захоплення електронів у кільці фенолу, так звана «пастка електронів» лежить в основі механізму «запам'ятовування». А моделі пристроїв на основі цих ефектів можна розглядати як такі, що містять штучні "коміркі пам'яті", зібрані з елементів на рівні молекул та молекулярних комплексів [2-6]. Такі фізичні явища та детальну розробку подібних пристроїв ми вже описували у попередніх публікаціях [4, 6].

При створенні власної версії фізичної моделі штучної молекулярної пам'яті раніше авторами було запропоновано застосувати молекули-похідні фенолу із замісниками - поліаміновими ланцюгами, лінійними або розгалуженими, різної довжини та складності [4, 6]. Була розроблена фізична модель молекулярних накопичувачів із властивостями штучної пам'яті, спираючись на вивчені нами механізми взаємодії ароматичних вуглеводнів з бішаровими ліпідними мембранами (рис. 2 та рис. 3). В основу запропонованої моделі можна покласти наступні факти, які були зареєстровані авторами та рядом інших дослідників-науковців [6]. 1. Вивчені хімічні сполуки (похідні ароматичних вуглеводнів із заступниками - лінійними поліамінами різної довжини та складності) є амфифільними речовинами, їх ароматичні групи можуть бути розчинені у гідрофобній ліпідній фазі мембран у складі комірки пам'яті розроблюваного пристрою, а їх поліамінові ланцюги можуть стирчати у навколишній простір. 2. Молекули досліджених авторами органічних сполук можуть утворювати координаційні комплекси з металами, наприклад, з іонами заліза Fe^{3+} (у той час, як у прототипі - з атомами золота Au) (рис. 1,б). 3. Розраховане на основі отриманих авторами експериментальних даних, значення коефіцієнта Хілла становило 0,86, що свідчило про приєднання однієї молекули досліджених сполук (JSTX-3, AR, тощо) до однієї молекули на поверхні мембрани у складі розроблюваного запам'ятовуючого пристрою. Запропонована й описана фізична модель ШМП дозволяє виготовити і випробувати елементи нано-пам'яті - технічні пристрої з властивостями "штучної пам'яті" на основі сполук фенолу.

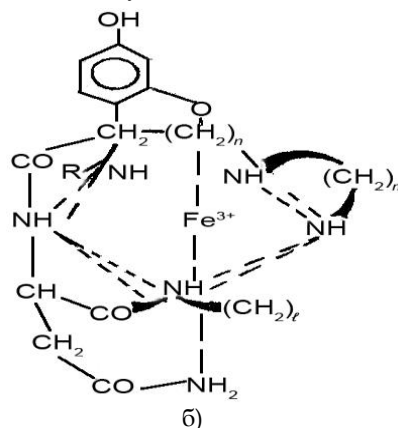


Рис. 1. Прототип елементарного фрагменту нано-пам'яті із органічних молекул [2, 3, 6]

а) Прототип, вид згори. Видно, що як і у прототипі [1], фрагмент розділений на компартменти - різні функціональні зони. Прямокутні темні зони контактів та округлі темні кола - локуси кріплення молекул ароматичних вуглеводнів - похідних фенолу або індоли. б) Структура хелатного комплексу токсину JSTX-3 і катіона заліза Fe^{3+} (пояснення дивись у тексті)

Пізніше авторами була запропонована теоретично можлива фізична модель, у якій у якості елемента ШМП було застосовано хімічні сполуки, подібні до попередньо розглянутих: похідні індолу із замісниками – поліаміновими ланцюгами, лінійними або розгалуженими, різної довжини та складності [5, 6]. Тобто, на відміну від вищеописаних сполук, тут замість фенольного кільця є присутнім фрагмент індолу – поєднані разом 5- та 6-членні ароматичні кільця. У роботах автора були досліджені у біофізичних експериментах такі сполуки, як аргіопінін 1 (ARN-1) та аргіопінін 2 (ARN-2). В основу моделі на основі сполук-похідних індолів можна покласти такі ж факти, які викладені у попередньому абзаці та які були зареєстровані авторами та рядом інших дослідників-науковців [6]. У цьому відношенні властивості сполук були подібними, що дозволило описану гіпотетичну фізичну модель поширити і на цей клас сполук (рис. 2, 3).

Фрагмент штучної молекулярної пам'яті на основі суміші двох типів молекул-похідних фенолу та індолу. Поставлена задача була вирішена за рахунок того, що була створена та протестована фізична молекулярна пам'ять, що складається із матриці з комірок, утворених шарами – плоскими фрагментами ліпідної гідрофобної бішарової мембрани зі зв'язаними із ними органічними та неорганічними речовинами. Вирішення такої задачі було нами зареєстровано, як два винаходи (корисні моделі) в Україні [4, 5] та детально описано у статті [6]. Відповідний спосіб [4] характеризується тим, що при його здійсненні виконують такі елементи пам'яті шляхом формування (наслоювання) 2D та/або 3D шарів, які мають ізотропні та анізотропні властивості, причому шари з ізотропними та анізотропними властивостями чергують між собою, а до складу одного чи кількох таких шарів входять пов'язані із ним (ними) молекули похідних фенолу та індолу із замісниками – поліаміновими ланцюгами різної довжини та різного ступеня складності; такі молекули можуть бути однаковими або різних типів, штучного або природного походження. Для тестування функцій таких елементів пам'яті нами запропоновано виконувати реєстрацію електричних струмів через них застосовуючи методи patch-

clamp та voltage-clamp, які були розроблені раніше у галузі біофізики для реєстрації трансмембранних електричних іонних струмів [6, 7].

Для виготовлення описуваної системи нами було розроблено кількоступінний процес попередньої обробки ліпідних бішарових мембран та підготовку компонентів з органічних речовин-похідних фенолу та індолу. Виконавши послідовно необхідні етапи роботи, було отримано систему, яка є фізичною моделлю пристрою зберігання інформації. Розроблена фізична модель демонструвала властивості штучної «пам'яті» (рис. 2, 3). Вона була подібною до інших з прототипів, які готували за допомогою молекул хіноліну та/або молекул, одержуваних з оліго нітроаніліну (фенілен етилену) (рис. 2, 3). Однак у нашому випадку робота проводилася з використанням інших типів молекул – похідних фенолу та індолу (речовин JSTX-3, AR, ARN-1, ARN-2). Запропоновані нами речовини, а саме похідні фенолу та індолу із замісниками – поліаміновими ланцюгами різної довжини та складності, необхідно було наносити на поверхню мембран. Такі молекули могли бути однакового чи різного типу, штучного чи природного походження; а дослідні системи формували шляхом нашарування (наслоювання) один-на-один 2D та/або 3D шарів необхідних органічних та неорганічних речовин, які за потребою могли замінювати. Необхідною умовою функціонування такої системи із пам'яттю було те, щоб шари з ізотропними та анізотропними властивостями чергувалися між собою. Тестування придатності таких зразків до виконання функцій пам'яті проводили експериментальним шляхом. Записи електричних струмів через зразки було зареєстровано. Електричні струми, що протікали через зразок, були асиметричними залежно від того, чи протікали вони вздовж поліамінового ланцюга "до" або "від" фенольного кільця. Для реєстрації та тестування таких елементарних електричних струмів використовували методи patch-clamp та фіксації потенціалу на мембрані. Таким чином, у результаті проведених експериментів, нами було продемонстровано, що створена фізична модель мала властивості зберігання інформації – властивості "молекулярної пам'яті".

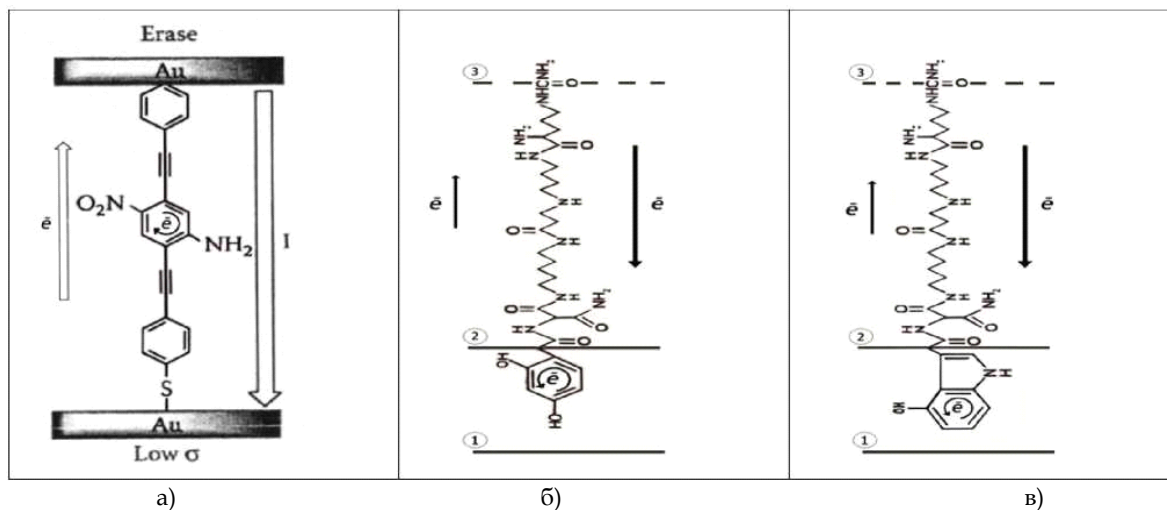


Рис. 2. Елементи молекулярного пристрою штучної пам'яті [4, 5, 6]

а) Молекулярний елемент, реалізований у прототипі, б) запропонований елемент з похідним фенолу JSTX-3, в) запропонований елемент з похідним індолу ARN-1. Вертикальні асиметричні стрілки вказують різні величини електричних струмів в обох напрямках; товщина та довжина стрілок прямо пропорційні величині струму. Захоплення електронів у «пастку» схематично показано стрілками у 6-членних циклах

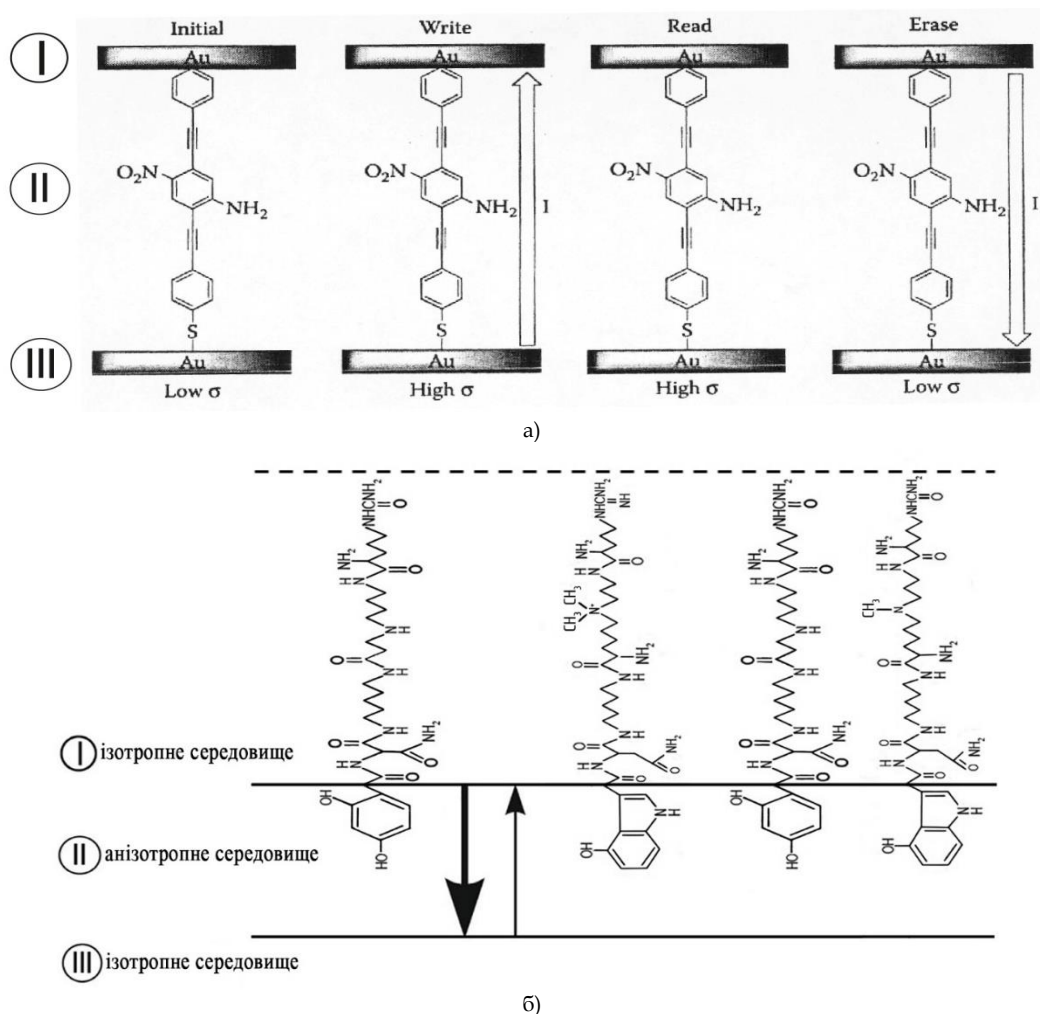


Рис. 3. Зборка елементарних фрагментів нано-пам'яті із органічних молекул [4, 5, 6]

а) Прототип у поперечному розрізі. б) Фрагмент запропонованого пристрою нано-пам'яті з органічними молекулами - похідними фенолу з лінійним замісником - поліаміном. Зображено випадок, у якому застосовано молекули JSTX-3 (але можливо застосування інших молекул з подібними властивостями). Елементарна система з "штучною пам'яттю" повинна бути зібрана з набору ізотропних та анізотропних шарів, які чергуються між собою. I, III - ізотропні середовища, II - анізотропне середовище (пояснення в тексті)

Описана вище система являла собою одиничний фрагмент - елемент, який було названо «коміркою» нано-пам'яті. Наступним логічним кроком розробки фізичного молекулярного пристрою зберігання інформації, було утворення ансамблю таких елементів, який складався з матриці з «комірок». Кожна із цих «комірок» була утворена з шарів - плоских фрагментів ліпідної гідрофобної двошарової мембрани із поєднаними із нею органічними та неорганічними речовинами. Як описано вище, кожен із цих елементів виконували шляхом формування (нашарування) 2D та/або 3D шарів, які мали ізотропні та анізотропні властивості. Шари з ізотропними та анізотропними властивостями чергувались між собою. Один або більше таких шарів містили молекули похідних фенолу із замісниками - поліаміновими ланцюгами різної довжини та складності. Такі молекули могли бути однакових або різних типів, штучного або

природного походження. Зразок такого фрагмента штучної пам'яті наведено на Рис. 2 для похідних фенолу JSTX-3 (рис. 2,б) та індолу ARN-1 (рис. 2,в).

Запропоновані нами методи [4, 5, 6] створюють можливість модифікувати та створити нові типи молекулярних елементів природного та штучного походження для пристроїв молекулярної пам'яті, а також протестувати їх функції, зареєструвавши електричні струми через виконаний зразок методами patch-clamp та фіксації потенціалу на мембрані. Зареєстровані трансмембранні електричні струми мали асиметричний характер та продемонстрували властивості штучної пам'яті.

З метою створення зразків таких нано-пристроїв для штучного зберігання інформації, необхідно було виконати кілька етапів робіт. Цей робочий процес був описаний у наших попередніх публікаціях [4, 5, 6]; розроблені методи захищені патентами України [4, 5].

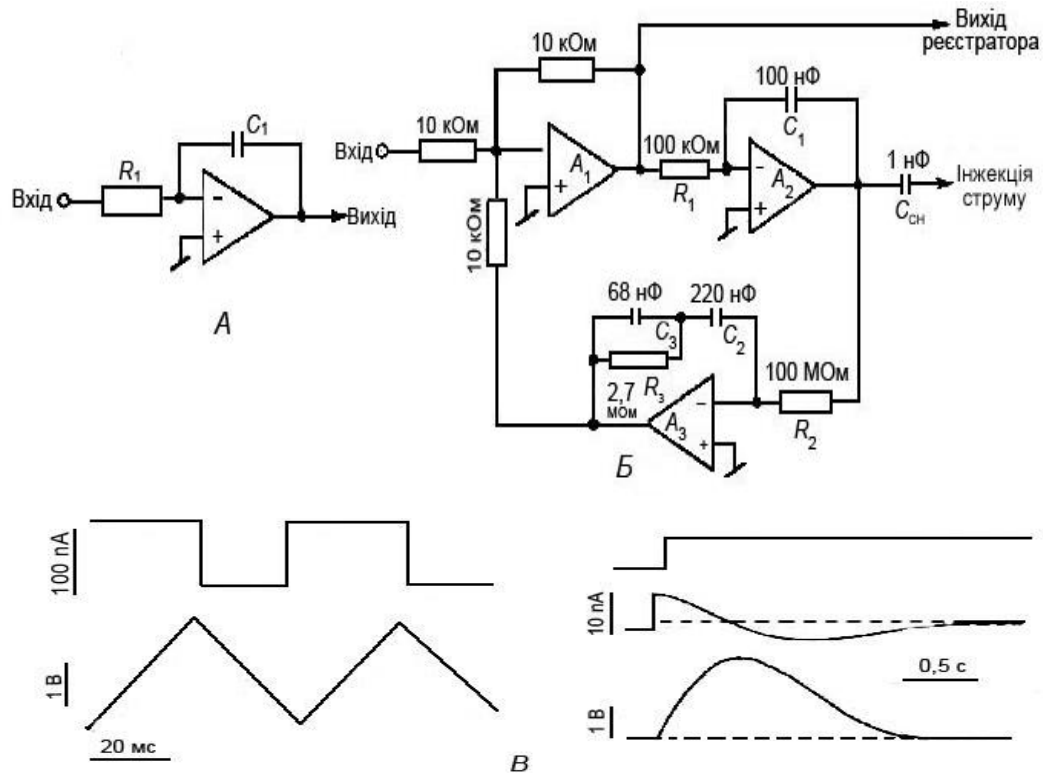


Рис. 4. Інтегратор для інжекції тестуючого сигналу для тестування виготовлених зразків нано-пам'яті методом patch-clamp. На вхід системи інформація надходить у вигляді електричних або хімічних сигналів, на виході інформацію реєструють у вигляді електричних сигналів [7]

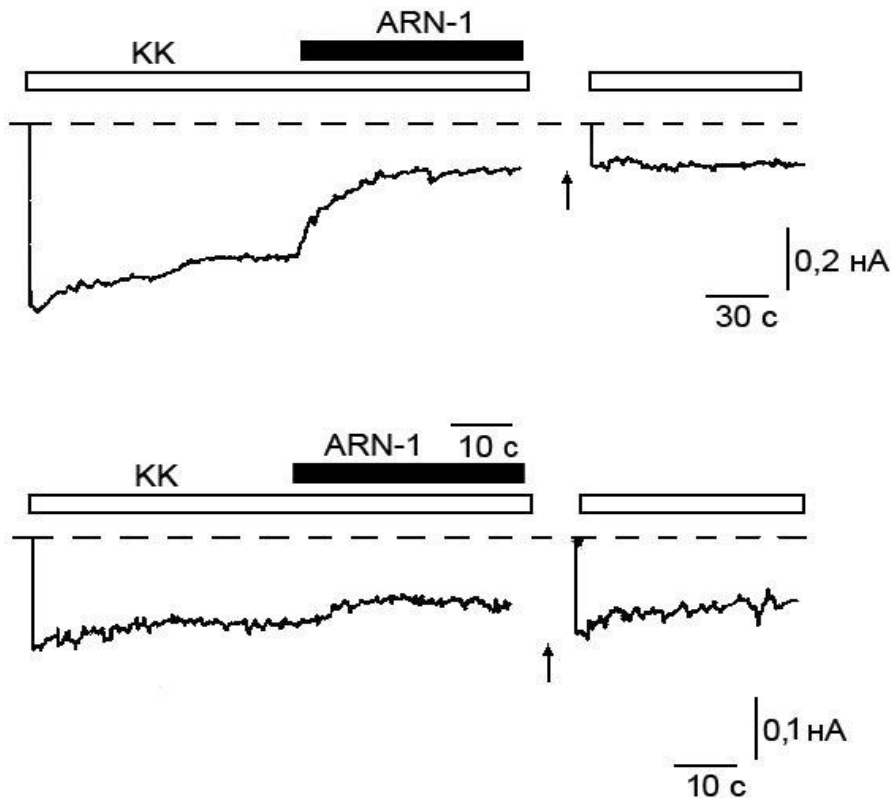


Рис. 5. Експериментальні підтвердження розробленого способу та відповідного зразка – реальні записи, зроблені під час експерименту з реєстрації електричних сигналів на виході біосенсорної технічної системи. Продемонстровано запис електричних трансмембранних струмів, що виникають при дії на БФ каїнату (КК) при наступній дії на БФ сполуки ARN-1, похідної індолу з поліаміновим ланцюгом. Зареєстровано ефект необоротного блокування каїнатактивованих струмів молекулою аргіопінін 1 (ARN-1), яка демонструє неоднакові електропровідні властивості при переміщенні електронів у зовнішньому електричному полі уздовж її поліамінового ланцюга у протилежних напрямках: до фрагмента індолу та від нього. Скорочення: КК – каїнат, ARN-1 одне з похідних індолу з поліаміновим ланцюгом.

Можливості кодування та захисту інформації на основі фізичної моделі молекулярної пам'яті. Після виконання робіт [4-6] стало можливим запропонувати фізичну модель штучної "молекулярної пам'яті", аналогічної прототипу з молекулами хіноліну [3]. На рис. 2,а та рис. 3,а, представлено фрагменти нано-пам'яті з молекул-похідних нітро анілін оліго (фенілен етилену). Такий прототип було запропоновано у США, натеper продовжуються роботи із пібору найбільш підходящих молекулярних елементів для реалізації таким зразком його функцій як наноелемента штучної пам'яті. На рис. 1 зображено вже готовий зразок цього прототипу пам'яті, а саме його вигляд згори.

Як зазначалося у наших перших публікаціях на цю тему [4, 6], нами запропоновано для цієї ж мети застосувати сполуки-похідні фенолу, наприклад, природні сполуки-токсини JSTX-3 та AR (рис. 2). Механізм пам'яті тут реалізується завдяки ефекту так званої «електронної пастки», який зображено на схемах на рис. 2. Електрони, які формують електричні нано-струми, можуть бути захоплені цією «пасткою електронів», якою тут виступає шестичленний цикл фенолу. Час перебування електронів у таких «пастках» був різним, залежно від їх переміщення у різних напрямках «до» або «від» фенольного циклу та від ряду інших факторів, наприклад, від асиметрії системи [6]. Отже, й елементарні опори електронним струмам в обох напрямках також були різними, реалізуючи "1" або "0" в такому елементарному пристрої зберігання інформації.

Можливості кодування інформації у системі із сумішшю двох типів похідних: фенолу та індолу. У перших описаних нами фізичних моделях [4] у якості елемента ШМП було обрано сполуки-похідні фенолу JSTX-3 та AR. Уявимо гіпотетичну фізичну модель, у якій у якості елемента ШМП застосовано суміш похідних двох типів циклічних сполук – фенолу та індолу (наприклад, природні сполуки-токсини JSTX-3 та ARN-1). У системі із сумішшю двох типів похідних – фенолу (1) та індолу (2) будемо спостерігати складніший ефект. Очікувано, час перебування електронів у «електронній пастці» індольної групи (2) буде довшим, ніж у випадку групи фенолу. Відповідно, електронна провідність потоку електронів у випадку (2) буде нижчою в N разів, аніж у випадку (1). Оскільки величина елементарних опорів дорівнює одиниці, поділений на величини елементарних провідностей, то й опори перебуватимуть у взаємозалежності (але – оберненій). Тобто, те ж саме буде справедливим і для елементарних опорів електронним струмам в обох напрямках вздовж ланцюга поліаміну. Отже, якщо ми приймаємо для системи з похідними фенолу (1), що ми реалізуємо "1" або "0" у такому елементарному пристрої зберігання інформації, то при внесенні молекул – похідних індолу (2), отримаємо додатково ще й дробові значення інформаційних бітів (наприклад, $\frac{1}{4}$, $\frac{3}{4}$ і т.д.). Відповідно, зростають можливості для кодування інформації у системі (2).

Можливості захисту інформації у системі із сумішшю двох типів похідних. Відповідно, можливості захисту інформації у системі із сумішшю двох типів похідних: фенолу та індолу також збільшуються. Це від-

бувається внаслідок того що, ідучи шляхом збільшення кількості значущих молекулярних елементів, які приймають участь у кодуванні, то на наступному етапі ми створюємо можливість заміни одного такого елемента іншим. Враховуючи те, що у природі існують мільйонів типів органічних молекул, можна отримати величезну кількість значущих їх комбінацій. «Зламати» такий молекулярний код стає практично неможливо.

На рис. 4 наведено схематичне зображення одного з блоків у схемі експериментальної установки для тестування виготовлених зразків нано-пам'яті методом patch-clamp. На рис. 5 наведено експериментальне підтвердження розробленого способу та пристрою: записи трансмембранних електричних струмів, які виконано із застосуванням методу реєстрації трансмембранних іонних струмів у режимі фіксації потенціалу [6, 7].

ВИСНОВКИ

У даній статті було запропоновано новий тип хімічних сполук ряду похідних індолу, які потенційно можуть бути застосовані для виконання функцій штучної молекулярної пам'яті у нано-електронних пристроях. Була описана розроблена гіпотетична фізична модель штучної молекулярної пам'яті на основі двох типів органічних сполук – похідних фенолу та індолу. Для виготовлення системи було розроблено кількісний процес обробки вихідних матеріалів – фрагментів двошарових мембран, поєднаних із набором органічних речовин. У результаті була отримана система, яка є фізичною моделлю нано-пам'яті. Розроблена фізична модель демонструвала властивості штучної «пам'яті» (рис. 2, 3). Вона була подібною до інших прототипів, які виготовляли за допомогою молекул хіноліну та/або молекул-похідних нітро анілін оліго (фенілен етилену). Однак у нашому випадку було застосовано молекули інших типів – похідні фенолу (JSTX-3, AR) та індолу (ARN-1, ARN-2). На поверхню мембран наносили такі речовини, які являють собою похідні фенолу та індолу із замінниками – поліаміновими ланцюгами різної довжини та складності. Такі молекули можуть бути однакового чи різного типу, штучного чи природного походження. Виготовлені нами системи були сформовані шляхом нашарування один на одного 2D та/або 3D наборів шарів органічних та неорганічних речовин, які можна було замінювати. Шари з ізотропними та анізотропними властивостями повинні чергуватися один з одним. Випробування функціонування таких зразків проводили шляхом запису електричних іонних струмів, які проходили через них. Струми були асиметричними залежно від того, чи протікали вони по поліаміновому ланцюгу "до" чи "від" фенольного циклу. Для реєстрації та випробування таких елементарних електричних струмів використовували методи patch-clamp та реєстрації трансмембранних іонних струмів у режимі фіксації потенціалу.

Запропонована нами гіпотетична фізична модель продемонструвала властивості зберігання інформації – властивості "молекулярної пам'яті". Проте деякі отримані дані носять попередній характер. Для виготовлення промислових зразків необхідно виконати великий об'єм подальших робіт.

Щодо прикладного значення виконаної фізичної моделі «комірки нанопам'яті» при розробці нових моделей сучасних комп'ютерів, то отриманий у роботі технічний результат полягає у наступному. Запропонований спосіб дозволяє модифікувати та утворювати нові елементи пам'яті природного та штучного походження, а також виконувати тестування їх функціонування шляхом реєстрації електричних струмів через утворений зразок. Зареєстровані струми мають асиметричний характер, демонструючи властивості пам'яті зразка. Необхідно зазначити, що розробники подібних нано пристроїв ведуть пошук в усьому світі речовин – потенційно здатних на виконання відповідних функцій, відповідні рішення розглядаються. Відповідно, автори запропонували та запатентували свої аналоги речовин - розроблені методи та пристрої захищені патентами України на корисні моделі [4, 5]. У фіналі статті описано, які нові можливості кодування та захисту інформації на основі фізичної моделі молекулярної пам'яті відкриває виконана робота.

References

- [1]. W. Chen, T. Smith, S. Tiwari, *Nano-structure memory device*. Patent US5714766A. Priority: 1995-09-29. Assigned: 2015-10-05 to GLOBALFOUNDRIES INC.
- [2]. B. Tran, *Nano-Electronic Memory Array*. Patent US20080239791A1. Priority: 2004-04-06. Applied: 2008-10-02; pending – 2018.
- [3]. C. Chen, G. Hwang, C. Ting, Y. Chan, Z. Pei, C. Chang, C. Kung, *Nano compounds and organic memory devices comprising the same*. Patent US7641820B2. Priority: 2006-04-26. Applied: 2007-11-01; grant - 2010-01-05.
- [4]. О. Ключко, А. Білецький, В. Шутко, *Спосіб виготовлення фізичної молекулярної пам'яті в анізотропних середовищах з молекулами-похідними фенолу та індола*. Патент UA 135531 U; B82Y 40/00, B82Y 10/00, H01B 1/12, C12Q 1/00, G11C 13/00 – Опубл. 10.07.2019, Бюл. 13, КМ, власник НАУ.
- [5]. О. Ключко, А. Білецький, *Спосіб виготовлення фізичної молекулярної пам'яті в анізотропних середовищах з молекулами-похідними фенолу та індола*. Патент UA 141034 U; H01B 1/00, B82B 3/00, B82Y 10/00. – Опубл. 25.03.2020, Бюл. 6, КМ, власник НАУ.
- [6]. О. Ключко, "Aromatic hydrocarbons of Arthropoda species: mechanisms of action on biological membranes and perspectives of biomedical application", *Biotechnologia Acta*, K, V. 13, no. 2, pp. 12-31, 2020.
- [7]. Ф. Сигворс, Б. Сакман, Э. Неер, *Регистрация одиночных каналов*, М.: Мир, 1987, 448 с.

УДК 004:591.5:612:616-006

Ключко О.М., Шутко В.Н., Колганова А.А. Физическая модель искусственной молекулярной памяти на основе двух типов органических соединений

Аннотация. В данной статье была описана разработанная гипотетическая физическая модель искусственной молекулярной памяти на основе двух типов органических соединений - производных фенола и индола, которые могут быть применены для выполнения функций такой памяти в нано-электронных устройствах. Разработана физическая модель продемонстрировала свойства искусственной «памяти». Она была подобна другим прототипам, которые изготавливали с помощью молекул хинолина и / или молекул производных нитроанилин олиго (фенилен этилена), однако нами были применены молекулы других типов - смесь производных фенола и индола с заместителями - полиаминовыми цепями различной длины и сложности (JSTX-3, AR, ARN-1, ARN-2). Изготовленные нами системы были сформированы путем наслаивания друг на друга 2D и/или 3D наборов слоев органических веществ, которые можно было заменять. Слои с изотропными и анизотропными свойствами должны чередоваться между собой. Испытания функционирования таких образцов проводили путем записи электрических ионных токов, которые проходили через них. Токи были асимметричными в зависимости от того, протекали они по полиаминов цепи "до" или "от" фенольного цикла. Для регистрации и испытания таких элементарных электрических токов использовали методы patch-clamp и регистрации трансмембранных ионных токов в режиме фиксации потенциала. Некоторые полученные данные носят предварительный характер и для изготовления промышленных образцов необходимо выполнить большой объем дальнейших работ. Предложенный способ позволяет модифицировать и создавать новые элементы памяти естественного и искусственного происхождения, а также выполнять тестирование их функционирования путем регистрации электрических токов через выполненный образец. Зарегистрированные токи имеют асимметричный характер, демонстрируя свойства памяти образца. Разработанные методы и устройства защищены патентами Украины на полезные модели. Описано, какие новые возможности кодирования и защиты информации на основе физической модели открывает выполненная работа.

Ключевые слова: физическая модель, искусственная молекулярная память, нано-электронная память, химические соединения, производные фенола, производные индола.

Klyuchko O., Shutko V., Kolganova O. Physical model of artificial molecular memory based on two types of organic compounds

Abstract. This paper describes the developed hypothetical physical model of artificial molecular memory based on two types of organic compounds - phenol and indole derivatives, which can potentially be used to perform the functions of memory in nano-electronic devices. The developed physical model demonstrated the properties of artificial "memory". It was similar to other prototypes made with quinoline molecules and/or nitro aniline oligo derivatives (phenylene ethylene), but we used other types of molecules - a mixture of phenol and indole derivatives with substitutes - polyamine chains of different length and complexity (JSTX-3, AR, ARN-1, ARN-2). The systems we developed were formed by layering 2D and/or 3D sets of layers of organic substances that could be replaced. Layers with isotropic and anisotropic properties should alternate. Functional

tests of such samples were performed by recording the electric ionic currents that passed through them. The currents were asymmetric depending on whether they flowed along the polyamine chain "to" or "from" the phenolic cycle. To record and test such elementary electric currents, patch-clamp methods and registration of transmembrane ionic currents in the potential fixation mode were used. Some of obtained data were preliminary and a great further work is necessary to produce the industrial samples. The proposed method allows to modify and create new memory elements of natural and artificial origin, as well as to test their functioning by the registration of electric currents through the formed sample. The recorded currents were asymmetric, demonstrating the memory properties of the sample. Developed methods and devices were protected by patents of Ukraine. New possibilities of coding and protection of information on the basis of physical model of obtained results were described as well.

Keywords: physical model, artificial molecular memory, nano-electron memory, chemical compounds, phenol derivatives, indole derivatives.

Ключко Олена Михайлівна, кандидат біологічних наук (біофізика), доцент кафедри електроніки, робототехніки, моніторингу та Інтернету речей Національного авіаційного університету.

Ключко Елена Михайловна, кандидат биологических наук (биофизика), доцент кафедры электроники, робототехники, мониторинга и Интернета вещей Национального авиационного университета.

Klyuchko Olena, Candidate of Science (Biophysics), Associate Professor of the Chair of electronics, robotics, monitoring and Internet of things of the National Aviation University.

Шутко Володимир Миколайович, доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри електроніки, робототехніки, моніторингу та Інтернету речей Національного авіаційного університету.

Шутко Владимир Николаевич, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедры электроники, робототехники, мониторинга и Интернета вещей Национального авиационного университета.

Shutko Volodymyr, Doctor of Sciences (Technique), Full Professor, Chair of Department of electronics, robotics, monitoring and Internet of things of the National Aviation University.

Колганова Олена Олегівна, кандидат технічних наук, асистент кафедри інженерії програмного забезпечення Національного авіаційного університету.

Колганова Елена Олеговна, кандидат технических наук, ассистент кафедры инженерии программного обеспечения Национального авиационного университета.

Kolganova Olena, Candidate of Sciences (Technique), Assistant Professor of Department of software engineering of the National Aviation University.

Отримано 23 червня 2020 року, затверджено редколегією 19 липня 2020 року
